

# ПРИМЕНЕНИЕ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ НА ПРИВОДНОМ ГТД

Овчинников В.Н., Идельсон А.М.

ОАО "Самарское конструкторское бюро машиностроения", г. Самара

Основной путь повышения КПД приводного газотурбинного двигателя заключается в повышении параметров цикла- степени повышения давления и степени подогрева воздуха, а также в повышении КПД узлов двигателя.

На рис.1 приведена статистика уровня КПД для 50 отечественных и зарубежных приводных двигателей, применяемых на энергетических и газоперекачивающих установках. Относительное уменьшение КПД ( $\eta$ ) при уменьшении мощности привода ( $N$ ) связано в значительной степени с уменьшением степени повышения давления в цикле  $\pi_k$  ( см. рис.2 ).

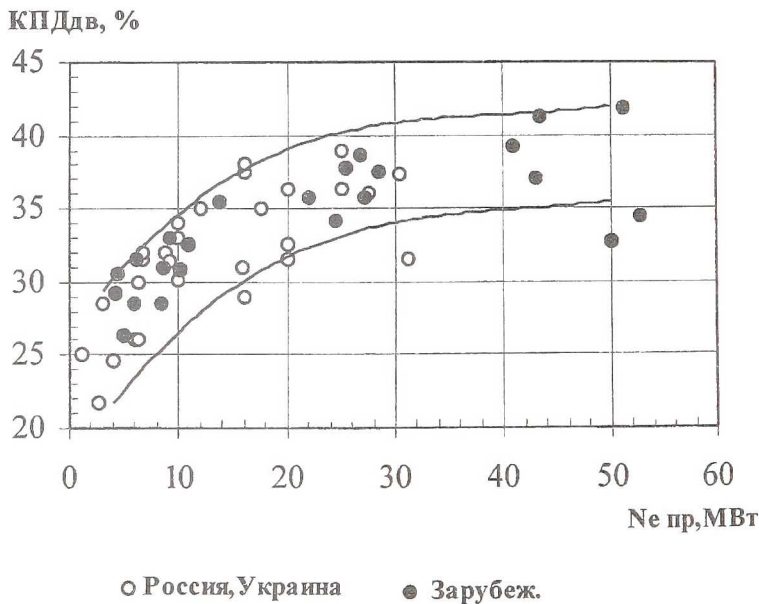
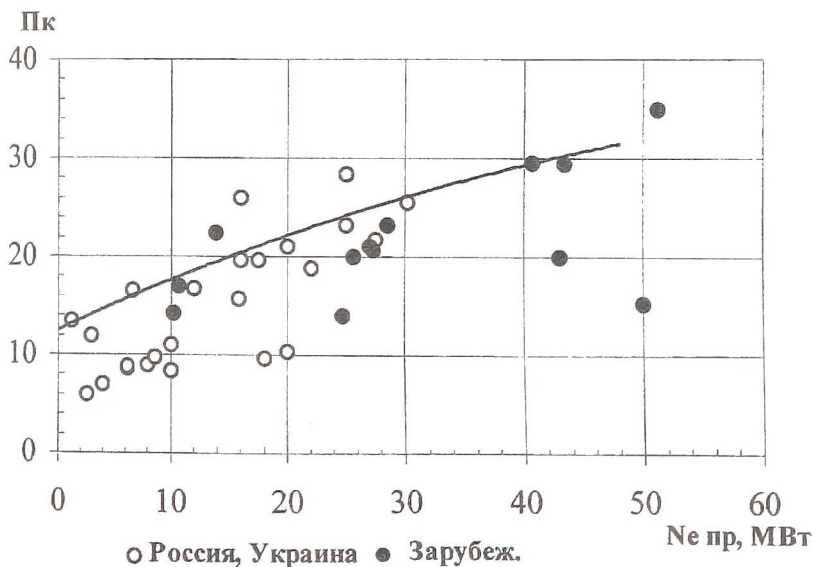


Рис.1 Зависимость КПД двигателя от мощности.

Увеличение  $\pi_k$  требует уменьшения высот лопаток последних ступеней компрессора и первых ступеней турбины. А это при относительно малой размерности приводит к существенному увеличению роли вторичных потерь давления ( парный вихрь, перетекание в зазорах ) и к падению

КПД компрессора и турбины. Поэтому оптимальные значения  $\pi_k$  при умеренных мощностях двигателя относительно более низкие.

Это обстоятельство, однако, является преимуществом при применении в цикле регенерации тепла выхлопных газов, из-за большей разности температур газа на выходе из турбины и воздуха на выходе из компрессора. Таким образом, уменьшение  $\pi_k$ , хоть и понижает эффективный КПД “чистого” цикла, но зато с лихвой компенсирует это из-за увеличения температурного перепада между “горячим” и “холодным” источниками в теплообменнике, где закомпрессорный воздух подогревается выхлопными газами. Ниже приведены результаты анализа по применению регенерации тепла выхлопных газов на двигателе НК-14СТ, применяемом на газоперекачивающих агрегатах. Двигатель НК-14СТ со свободной турбиной и с номинальной мощностью 8 МВт имеет  $\eta=32\%$  и  $\pi_k=9,8$ . Результаты расчетного анализа по изменению пропускных способностей турбины газогенератора  $A_4$  и свободной турбины  $A_5$  приведены на рис.3а,3б,3в. Расчет проведен для степени регенерации в теплообменнике 0,9.



**Рис.2 Зависимость степени повышения давления от мощности.**

Увеличение  $A_4$  приводит к уменьшению  $\pi_k$ . Как видно из рис.3а, повышение  $A_4$  на 20% в “чистом” цикле понижает КПД на 1,1%, а в цикле с регенерацией, благодаря увеличению подогрева в цикле, увеличивает КПД на 3 %. Всего при увеличении  $A_4$  на 20 % эффект от применения регенерации тепла выхлопных газов составил

по КПД - 10,7 %. При степени регенерации в теплообменнике 0,85 этот эффект на 1,1 % меньше.

КПД<sub>дв</sub>, %

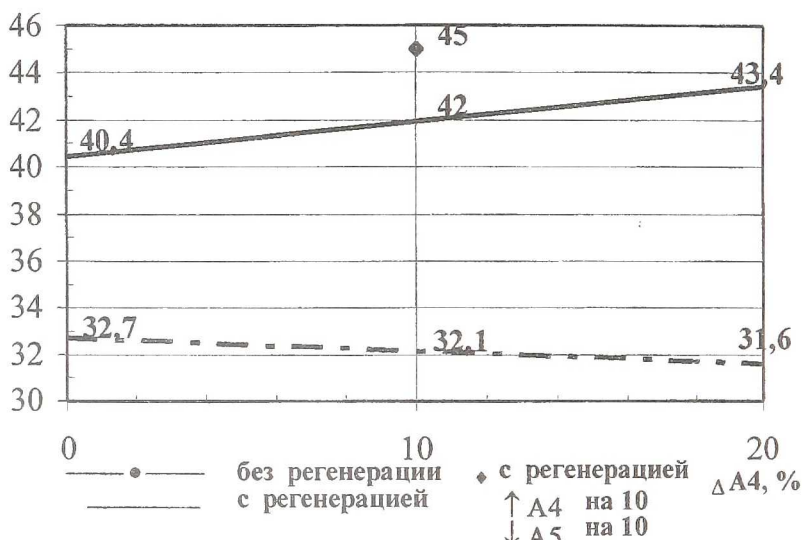


Рис3а. Влияние регенерации на параметры при  $N_{\text{непр}}=8,6$  МВт.

Повышение  $A_4$  на 20 % понижает  $\eta_k$  в цикле с регенерацией, по сравнению с базовым циклом на 15 % и повышает температурный перепад в теплообменнике на 70 % (со 174 К до 297 К).

Наличие потерь полного давления в коммуникациях, связанных с теплообменником, и в самом теплообменнике приводит к необходимости повышения температуры газа перед турбиной  $T_4^*$  для обеспечения мощности. Как видно из рис. 3б, на номинальном режиме  $T_4^*$  повышается при введении регенерации тепла на 91 К при  $A_4 = \text{Const}$  и на 116 К при повышении  $A_4$  на 20 %.

Повышение  $T_4^*$  вызвано появлением потерь полного давления в теплообменных коммуникациях: по "горячей" ветке  $\Delta P^* = 3,36...5,34$  % и по "холодной" ветке 4...6% в зависимости от степени регенерации (0,75...0,9). Повышение температуры газа является достаточно серьезным фактором при выборе степени регенерации, величины  $\eta_k$  (другими словами,  $A_4$ ) и при подходе к конструированию при поиске компромисса между величиной гидравлических потерь и объемом конструктивных изменений. Третьим параметром (кроме  $\eta$  и  $T_4^*$ ), на который следует обратить внимание при введении регенерации, является запас газодинамической устойчивости (ГДУ) на режиме минимальной мощности.

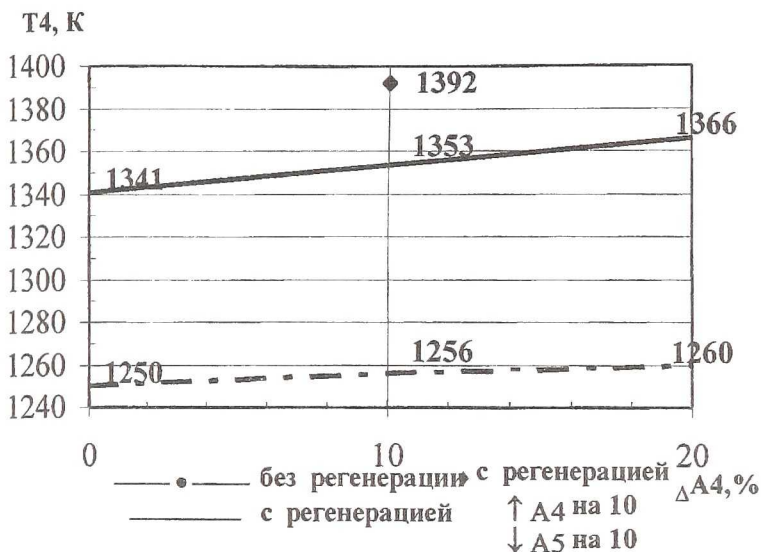


Рис.3б. Влияние регенерации на параметры при  $N_{пр}=8,6$  МВт.

Собственно, проблема ГДУ - это и есть проблема выбора величины допустимой минимальной мощности без открытия клапанов перепуска воздуха в компрессоре. На рис.3в запас ГДУ условно представлен величиной запаса по частоте вращения  $\Delta n_{ср}$  между номинальным режимом и условной границей устойчивой работы компрессора. Исходя из условия сохранения величины минимальной мощности величина запаса  $\Delta n_{ср}$  (380 об/мин) при введении регенерации тепла сохраняется при увеличении  $A_4$  не менее, чем на 16 %.

Другим путем уменьшения  $\eta_k$  в цикле является уменьшение пропускной способности свободной турбины. Это довольно эффективный способ. Как видно из рис.3а, увеличение  $A_4$  на 10% в цикле с регенерацией увеличивает КПД на 1,6%, а дополнительное уменьшение  $A_5$  увеличивает КПД еще на 3%. Однако при этом  $T_4^*$  увеличивается на 40 К (см.рис.3б), а запас ГДУ резко уменьшается ( $\Delta n_{ср} = 90$  об/мин см.рис.3в). Поэтому путь уменьшения  $A_5$  оказывается нереализуемым. При окончательном выборе варианта коррекции характеристик турбины газогенератора при введении регенерации тепла на готовом серийном двигателе следует также учитывать влияние способа изменения  $A_4$  на КПД турбины газогенератора.

При разработке проекта двигателя НК-14СТ, как модификации с введением системы теплообменника, был принят вариант с увеличением  $A_4$  на 15...17% путем изменения площади проходного сечения соплового аппарата 1-ой ступени турбины.



